



УДК 658.5:69.003
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-44-51

Научная статья



Влияние аутригерных систем на пространственную жесткость объекта параметрической архитектуры

Г. М. Кравченко , **Е. В. Труфанова**, **Д. А. Высоковский**

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
✉ galina.907@mail.ru

Аннотация

Введение. В актуальных строительных нормах и правилах введены требования к пространственной жесткости зданий и сооружений. Для выполнения поставленных условий применяют различные конструктивные решения: аутригерные системы, контурные балки, подстропильные конструкции и т.д. В настоящее время для высотных зданий самым распространенным конструктивным решением является введение аутригерных систем в каркас здания.

Материалы и методы. Исследована эволюция формообразования эпициклоидной цилиндрической поверхности в программном комплексе «САПФИР». По результатам исследования определена оптимальная форма объекта параметрической архитектуры. Разработаны пять вариантов конструктивных решений объекта. Выполнено моделирование разработанных каркасов по плитно-стержневой расчетной схеме методом конечных элементов в программном комплексе «ЛИРА-САПР».

Результаты исследования. Анализ результатов статического и динамического расчетов позволяет выбрать рациональный вариант каркаса объекта параметрической архитектуры и обеспечить необходимую прочность с максимальной экономией расходов на материалы для аутригерного этажа. В процессе проведения эксперимента устанавливается эффективность регулирования динамических характеристик каркаса здания, сравниваются технические и экономические показатели предлагаемых вариантов и конструктивных мер, направленных на повышение общей жесткости здания.

Обсуждение и заключения. Проведен сравнительный анализ эффективности регулирования динамических характеристик каждой схемы. Выбрана наиболее рациональная конструктивная схема высотного здания, удовлетворяющая условиям прочности и жесткости с максимальной экономией материала. Кроме эффективного регулирования динамических характеристик горизонтальные пояса жесткости применены как конструктивное мероприятие для предотвращения и защиты высотного здания от прогрессирующего воздействия, которое характеризуется полным или частичным обрушением сооружения.

Ключевые слова: высотное здание, аутригерный этаж, модальный анализ, динамический расчет, метод конечных элементов, несущая способность, каркас здания.

Для цитирования. Кравченко, Г. М. Влияние аутригерных систем на пространственную жесткость объекта параметрической архитектуры / Г. М. Кравченко, Е. В. Труфанова, Д. А. Высоковский // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. — 2022. — Т. 1, № 4. — С. 44–51.
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-44-51

Original article

Influence of Outrigger Systems on the Spatial Rigidity of an Object of Parametric Architecture

Galina M. Kravchenko ✉, **Elena V. Trufanova** , **Dmitry A. Vysokovsky**

Don State Technical University, Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ irina1000000@gmail.com

Abstract

Introduction. In the existing building industry standards and regulations there are currently put into effect the requirements for the spatial rigidity of buildings and structures. For fulfillment of the set requirements various design solutions are used: outrigger systems, edge beams, subrafter constructions etc. Currently the most common design solution for high-rise buildings is integration of the outrigger systems into a building frame.

Materials and methods. The evolution of forming the epicycloid cylindrical surface in the SAPPHIRE software was investigated. Based on the results of the study, the optimal form of a parametric architecture object was determined. Five versions of an object design solutions were developed. Modeling of the elaborated building frames was performed in the LIRA-SAPR software based on the slab-beam design model by the finite element method.

Results. The analysis of static and dynamic calculations results enables to choose the rational version of a parametric architecture object frame and to provide the necessary strength attributed with maximum possible lean consumption of the materials for the outrigger storey. In the course of experiment the efficiency of a building frame dynamic properties regulation is defined, the technical and economic indicators of the proposed versions and design solutions aimed at increasing the overall rigidity of the building are compared.

Discussion and conclusion. A comparative analysis of the dynamic properties regulation efficiency was carried out for each structural scheme. The most rational scheme for a high-rise building was selected, the one meeting the strength and rigidity requirements and proving to be the most material saving. In addition to the efficient dynamic properties regulation, the horizontal stiffening rings were implemented as a constructive solution to prevent and protect a high-rise building from progressing impact which accounts for complete or partial collapse of the building.

Keywords: high-rise building, outrigger storey, modal analysis, dynamic calculation, finite element method, load-bearing capacity, building frame.

For citation. G. M. Kravchenko, E. V. Trufanova, D. A. Vysokovsky. Influence of Outrigger Systems on the Spatial Rigidity of an Object of Parametric Architecture. Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning, 2022, vol. 1, no. 4, pp. 44–51. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-44-51

Введение. В современной строительной индустрии стремительно развивается проектирование высотных зданий, которые являются символами успеха, лидерства и экономической мощи, признаком высокой конкурентоспособности страны. Для таких сооружений, как правило, на первый план выходят расчеты на динамические воздействия и определение динамических характеристик каркаса здания.

Исследования многих российских и зарубежных ученых направлены на разработку методов регулирования динамических характеристик высотных зданий, модификацию существующих численных методов расчета железобетонных и металлических конструкций для повышения надежности принятых конструктивных решений.

Возможность применения современной информационной и материальной научно-технической базы для анализа выбранной конструктивной схемы и дальнейшей корректировки повышают надежность и экономичность

проектного решения. Учет и регулирование динамических характеристик каркаса многоэтажного здания позволяет выбрать рациональную расчетную схему, необходимые сечения для нормальной работы отдельных конструктивных элементов и всего здания в целом.

В задачу проектирования высотных зданий входит определение влияния горизонтальных нагрузок с ростом высоты здания, так как эти значения при определенной высоте вызывают настолько большой горизонтальный прогиб, что требования жесткости несущих конструкций, а также необходимость выполнения регулирования динамических характеристик, выходят на первый план и становятся определяющими при выборе конструктивной схемы. Кроме того, эффективность принятой конструктивной схемы зависит от вида применяемого материала для несущих конструкций. Оптимизация конструктивной системы высотного здания сводится к достижению максимальной жесткости при минимальном весе.

В современном проектировании высотных зданий простые конструктивные системы встречаются редко. Чаще всего применяют комбинированные конструктивные схемы, позволяющие соединить в себе достоинства и сглаживать недостатки обычных схем. Каркасные системы широко применяются в строительстве высотных зданий, как правило, в чистом виде эта конструктивная схема наиболее рациональна при строительстве высоток до 30 – 35 этажей. Для более высоких зданий данная конструктивная схема считается неэффективной, поскольку не может обеспечить достаточную жесткость.

Каркасные здания позволяют свободно выполнять любое фасадное заполнение, в том числе и стеновое заполнение из кирпичной кладки, и свободно устраивать в них проемы.

Для обеспечения необходимой прочности и устойчивости высотного здания вводят систему аутригерных этажей. Степень, с которой будет повышаться общая жесткость и устойчивость здания при использовании аутригерных конструкций, зависит от их количества и местоположения [1–3]. При большом числе аутригерных систем минимизируются горизонтальные и вертикальные перемещения, при этом увеличивается устойчивость здания, с другой стороны, уменьшение количества аутригеров может привести к увеличению поперечных сечений колонн и ядра жесткости. Поэтому количество аутригерных этажей необходимо определять при разработке конструктивных решений здания. Исследования по оптимизации расположения поясов жесткости по высоте показывают, что первый аутригер выгоднее располагать на самом верхнем техническом этаже, а второй на 1/2 высоты здания. Этот аутригер будет контролировать общие перемещения верха здания.

В процессе формирования конструктивного решения и поиска наиболее рациональной формы плана высотных зданий проектировщики сталкиваются с главной проблемой — концентрацией горизонтальных нагрузок, а также необходимостью гашения колебаний и регулирования динамических характеристик. Поэтому в основном высотные здания проектируются преимущественно башенного типа. В нашей стране большинство высотных зданий принадлежат к наиболее простым в конструктивном плане группам: «параллелепипеды» и «цилиндры», что обусловлено в основном экономическими факторами.

Для разработки и оптимизации конструктивных решений высотных зданий используют технологии информационного моделирования (в том числе BIM-технологии), получившие широкое распространение во всех развитых странах мира. Этот сложный процесс позволяет создавать и использовать информацию по строящимся, а также завершенным объектам капитального строительства.

Актуальность BIM-технологий в строительстве возрастает с каждым годом в связи с разработкой все более масштабных и сложных проектов, а также благодаря появлению программного обеспечения. Данная технология обладает рядом преимуществ:

– возможность уменьшения количества ошибок на стадии проектирования, сокращение количества проектных изменений;

– улучшение коммуникаций между проектировщиками;

– заметное уменьшение стоимости строительства;

– сокращение общей продолжительности проекта.

Применение информационного проектирования в процессе исследования позволило определить условия для устройства аутригерных систем, дать рекомендации по распределению динамических нагрузок и определению местоположения аутригеров в здании.

Материалы и методы. Объектом исследования является здание параметрической архитектуры высотой 117,2 м с размерами в плане 37×37 м. Площадка строительства — г. Ростов-на-Дону. Несущая конструктивная система здания запроектирована таким образом, чтобы вертикальные несущие элементы располагались от фундамента один над другим по высоте здания, то есть были соосными. Несущая конструктивная система здания является регулярной в плане.

На первом этапе исследована эволюция формообразования эпициклоидной цилиндрической поверхности в программном комплексе «САПФИР». По результатам исследования определена оптимальная форма исследуемого объекта параметрической архитектуры.

Методом конечных элементов (МКЭ) выполнено моделирование пространственного монолитного каркаса здания в программном комплексе «ЛИРА-САПР». МКЭ является главным инженерным инструментом автоматизированного математического анализа напряженно-деформированного состояния строительных конструкций.

Плиты перекрытий и стены моделировались оболочными элементами, колонны — 3D-стержневыми элементами. Для всех конечных элементов использованы 6 степеней свободы в узле.

Современное проектирование высотных зданий не представляется возможным без использования горизонтальных поясов жесткости. Для каждого высотного здания конструкция и форма аутригера индивидуальны. Задача проектировщиков подобрать оптимальное положение и конструкцию аутригерного пояса к конкретной конструктивной схеме высотного здания.

Предложено пять видов конструктивных решений каркаса здания:

1) без аутригерных этажей;

2) с устройством аутригера на верхнем этаже в виде фермы;

3) с устройством двух аутригерных этажей в виде фермы на верхнем этаже и в середине здания;

4) с устройством аутригера на верхнем этаже в виде монолитной стены;

5) с устройством двух аутригерных этажей в виде монолитной стены на верхнем этаже и в середине здания.

Сведения об элементах конструкций:

– для несущих железобетонных конструкций принят бетон класса В35;

– для армирования конструкций принята арматура класса А500;

– высота перекрытий 235 мм;

– высота фундаментной плиты 1500 мм;

– сечение колонн изменяется от 600×600 мм до 400×400 мм по высоте здания;

– сечения диафрагм жесткости переменные по высоте (от 400 мм до 300 мм);

– стены подвала толщиной 400 мм;

– сечение ферменных аутригеров — 500×400 мм;

– толщина стенового аутригера — 200 мм.

Конечно-элементные модели каркаса здания параметрической архитектуры представлены на рис. 1.

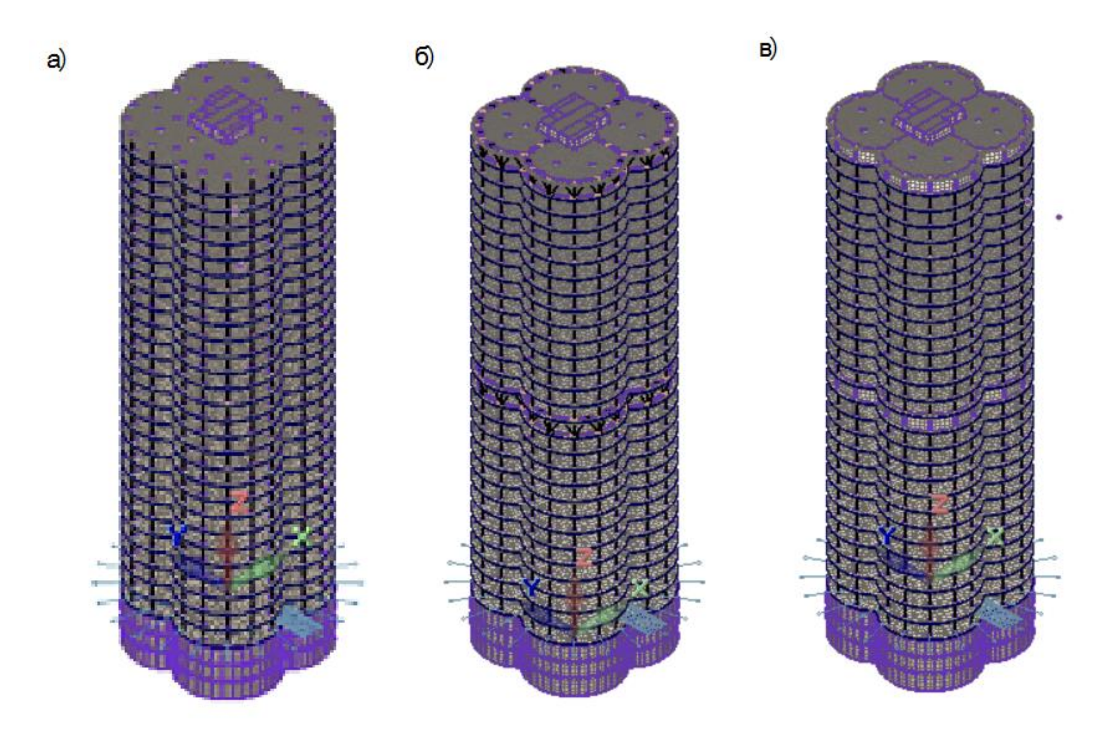


Рис. 1. Конечно-элементные модели каркаса здания:
а) модель №1; б) модель №3; в) модель №5 (рисунок авторов)

Предложено два вида аутригерных этажей: в виде железобетонных ферм и монолитных стен (рис. 2).

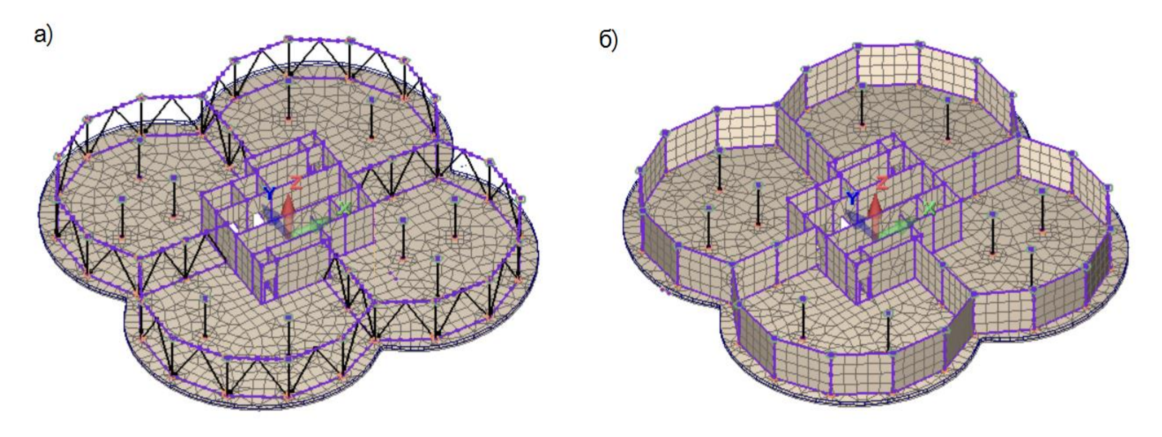


Рис. 2. Конструктивные решения аутригерных этажей:
а) вариант 1; б) вариант 2 (рисунок авторов)

В расчетных моделях учтены статические и динамические нагрузки: собственный вес, постоянная нагрузка на плиты перекрытий и покрытий, полезная нагрузка, снеговая нагрузка, ветровая нагрузка по X и Y (с учетом пульсационной составляющей).

Главной особенностью динамических нагрузок является их быстрое изменение величины, направления, места приложения. Эти нагрузки вызывают у зданий и сооружений колебания, которые необходимо учитывать при выполнении модального анализа.

Вид расчётной схемы сооружения имеет ключевое значение в выборе метода определения и анализа спектра частот и форм колебаний. Данный анализ позволяет на ранней стадии проектирования определить картину вынужденных колебаний, выявить наиболее невыгодные значения низших частот, периодичность и продолжительность кратковременных нагрузок.

При динамических воздействиях нужно учитывать не только перемещения точек сооружения колебательного характера, но и внутренние усилия и напряжения в его элементах. Определение спектра собственных частот, напряжений в несущих элементах высотного здания при его колебаниях, а также сравнение этих значений с предельными составляют основную задачу динамического расчета для проектировщиков.

В ходе исследования выполнен динамический расчет пяти вариантов расчетных схем. Получены частоты и формы собственных колебаний [4].

Результаты исследования. Результаты динамического расчета на собственные колебания показали, что для всех исследуемых моделей первая и вторая формы поступательные, третья форма носит крутильный характер движения, четвертая форма имеет изгибно-крутильный характер колебаний [5–7].

Предельное значение частоты собственных колебаний для железобетонных зданий, проектируемых в г. Ростов-на-Дону, равно 1,2 Гц. При определении пульсационной составляющей ветровой нагрузки необходимо учитывать формы собственных колебаний с частотами ниже предельной: первые четыре формы колебаний для второй, третьей, четвертой, пятой модели и первые пять форм собственных колебаний для первой модели [8].

По результатам общего статического расчета получено, что для конструктивного решения каркаса здания без аутригерного этажа (модель 1) не выполняются требования нормативной документации: горизонтальные перемещения превышают допустимые значения; превышено максимальное ускорение верхнего этажа здания (нарушено требование о динамической комфортности).

Таблица 1 содержит результаты напряженно-деформированного состояния с учетом динамических воздействий на каркас здания (пульсационная составляющая ветровой нагрузки).

Таблица 1

Максимальные горизонтальные и вертикальные перемещения

Модель №	Перемещения по осям, мм		
	X	Y	Z
1	204,0	224,0	148,0
2	172,0	189,0	117,0
3	157,0	172,0	95,5
4	155,0	170,0	104,0
5	134,0	147,0	82,9

Для обеспечения пространственной жесткости каркаса здания в расчетную схему необходимо ввести устройство связевых этажей. При выборе оптимальной конструктивной схемы аутригерного этажа и количества связевых элементов необходимо учитывать не только прочностные, но и экономические характеристики [9–10].

Во второй модели аутригерный этаж выполнен на верхнем техническом этаже в виде ферм. Верхний пояс, нижний пояс и раскосы выполнены из железобетона сечением 400×400 мм. Введение в конструктивную схему этажа повышенной жесткости существенно снизило вертикальные и горизонтальные перемещения каркаса здания.

В третьей модели аутригерные этажи выполнены из ферменных конструкций сечением 400×400 мм. Введение в расчетную схему второго аутригерного этажа позволило увеличить жесткость и прочность каркаса здания. Вертикальные перемещения сократились на 36 %, горизонтальные на 24 % по сравнению с моделью без аутригерных этажей.

В четвертой модели аутригерный этаж выполнен из монолитной железобетонной стены толщиной 200 мм, что позволило еще больше сократить перемещения вертикальных и горизонтальных конструкций по сравнению со второй моделью, однако увеличиваются и нагрузки на перекрытия.

В пятой модели введение двух монолитных железобетонных аутригерных этажей позволило существенно увеличить жесткость здания и сопротивление динамическим воздействиям. Недостатком является значительное

увеличение нагрузок и удорожание конструкции. График, представленный на рис. 3, демонстрирует расход материала по конструктивным решениям на устройство этажей повышенной жесткости.

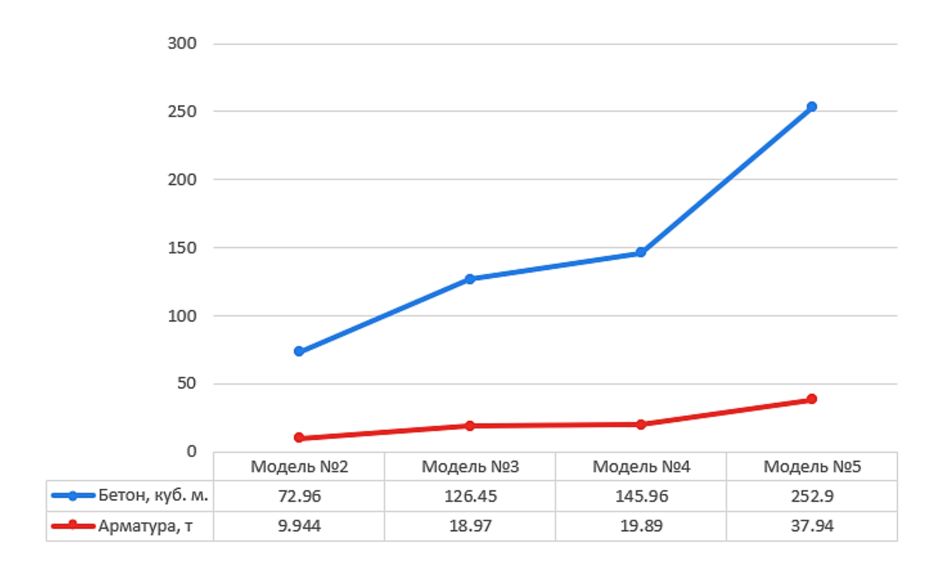


Рис. 3. График расхода материала (рисунок авторов)

В результате исследований показано, что модель № 4 с ферменными аутригерами на верхнем техническом этаже и в середине здания является самой рациональной. Применение данного конструктивного решения соответствует каркасу здания параметрической формы с необходимой прочностью и жесткостью с максимальной экономией расходов на материалы для аутригерного этажа.

Кроме эффективного регулирования динамических характеристик горизонтальные пояса жесткости применяются для предотвращения и защиты высотного здания от прогрессирующего воздействия, которое характеризуется полным или частичным обрушением сооружения.

Обсуждение и заключения. В данной работе был проведен ряд расчетов каркаса многоэтажного здания с учетом динамического ветрового воздействия с целью определения наиболее рационального способа регулирования динамических характеристик, увеличения сопротивления каркаса здания динамическим воздействиям, повышения общей жесткости здания.

С предложенными моделями проведены динамические расчеты, определены динамические характеристики каркаса здания и перемещения узлов несущих элементов.

Проведен сравнительный анализ эффективности регулирования динамических характеристик каждой схемы. Выбрана наиболее рациональная конструктивная схема высотного здания, удовлетворяющая условиям прочности и жесткости с максимальной экономией материала.

Библиографический список

1. Хи, С. Ч. Проектирование аутригерных систем / С. Ч. Хи, Т. Тхорнтон, Х. Гоман, Х. К. Аруп, М. Невилл // Высотные здания. — 2013. — № 5. — С. 5–8.

2. Травуш, В. И. Работа высотных зданий с применением этажей жесткости (аутригеров) / В. И. Травуш, Д. В. Конин // Вестник ТГАСУ. — 2009. — № 2. — С. 77–91.

3. Панасюк, Л. Н. Эффективность конструктивных решений аутригерных этажей высотного здания / Л. Н. Панасюк, Г. М. Кравченко, Е. В. Труфанова, А. Г. Бойко // Строительство и архитектура. — 2019. — № 3 (24). — С. 26–29.

4. Кравченко, Г. М. Исследование собственных колебаний здания сложной параметрической формы / Г. М. Кравченко, Е. В. Труфанова, И. Ю. Данилейко, В. А. Думбай // Молодой исследователь Дона. — 2019. — № 6 (21).

5. Сорока, М. Д. Особенности оценки напряженно-деформированного состояния несущей системы 25-ти этажного монолитного здания / М. Д. Сорока // Естественные и инженерные науки. — 2014. — № 1.

6. Панасюк, Л. Н. О точности определения напряженно-деформированного состояния и конструктивных параметров в областях с особенностями / Л. Н. Панасюк, Г. М. Кравченко, Е. В. Труфанова // Науковедение. — 2013. — № 3.

7. Агаханов, Э. К. Расчет зданий сложной геометрической формы на ветровые воздействия / Э. К. Агаханов, Г. М. Кравченко, Е. В. Осадчий, Е. Ф. Труфанова // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. — 2017. — № 2. — С. 8–17.

8. Кравченко, Г. М. Динамический расчет и анализ полусферической оболочки покрытия объекта «Зимний сад» Технопарка Ростовского государственного строительного университета (РГСУ) / Г. М. Кравченко, Е. В. Труфанова, С. В. Борисов, С. С. Костенко // Инженерный вестник Дона. — 2016. — № 1 — URL:https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2016/3494.

9. Moon, K. S. Studies on various structural system design options for twisted tall buildings and their performances / K. S. Moon // Structural Design of Tall and Special Buildings. — 2014. — Vol. 23. Issue 5. — Pp. 319–333.

10. Daigoro, I. Progressive Collapse Analysis of Structures / I. Diagoro // Butterworth-Heinemann. — 2017. — P. 24.

Поступила в редакцию 20.11.2022

Поступила после рецензирования 25.11.2022

Принята к публикации 30.11.2022

Об авторах:

Кравченко Галина Михайловна — доцент кафедры «Техническая механика» Донского государственного технического университета (344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID, galina.907@mail.ru.

Труфанова Елена Васильевна — доцент кафедры «Техническая механика» Донского государственного технического университета (344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID, el.trufanova@mail.ru.

Высоковский Дмитрий Александрович — доцент кафедры «Техническая механика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID, dmvysok@mail.ru.

Заявленный вклад авторов:

Г. М. Кравченко — научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования, корректировка выводов. Е. В. Труфанова — проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов. Д. А. Высоковский — анализ результатов исследований, доработка текста.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.